

промышленности: сб. трудов международной научно-практической конференции. – М.: ВНИИМЕТМАШ, 2004. – С. 183–187. 3. Сагитов Г.А., Вавилов Н.Ю. Энергетический баланс и варьирование параметров нестационарного очага деформации при периодической прокатке // Сортопрокатное производство : отрасл. сб. науч. тр. – Харьков: УкрНИИмет, 1978. – С. 52–56. 4. Медведев В.С., Крюков Ю.Б., Осипенко В.В. Сортопрокатные станы // Перспективы развития горно-металлургического комплекса : Материалы международной научно-практической конференции. – Краматорск, 2004. – С. 52–56.

*Поступила в редколлегию 11.11.2008*

**УДК 621.771.073.8:681.3.06**

**В.С. МЕДВЕДЕВ**, канд.техн.наук, НИИ «УкрНИИМет» УкрГНТЦ «Энергосталь»

## **МЕТОДИКА КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ УНИВЕРСАЛЬНЫХ КАЛИБРОВОК ВАЛКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯЩИЧНЫХ КАЛИБРОВ**

Розглянута формалізована методика комп'ютерного проектування універсальних калібрів валків з використанням ящичних калібрів у чернових клітях сортових станів, що базується на методі аналізу та відсіву варіантів. Проектування проводиться за допомогою пошагових процедур, рухаючись по кожній гілці "дерева" калібровки.

Formalized technique of computer designing of universal roll calibrations with using box calibers in roughing stands of section mills based on analysis and sifting of variants is considered. Designing is carried out with the help of step-by-step procedures under moving along each branch of a calibration "tree".

Эффективность работы сортового прокатного стана во многом определяется степенью универсальности калибровки валков. Чем больше используется общих калибров в технологической схеме прокатки, тем меньше переходов необходимо для производства профилей заданного сортамента. В конечном итоге это приводит к сокращению текущих простоев, снижению расхода рабочих валков, повышению среднечасовой производительности стана и улучшению качества продукции.

Общую схему калибровки валков сортового прокатного стана можно представлять в виде «дерева», разветвляющегося к чистовым проходам. При этом универсальность калибровки повышается с уменьшением числа калибров на каждом уровне (проходе) технологического процесса. Разработка общей схемы калибровки валков, обладающей максимальной универсальностью, является сложной технической задачей, решение которой зависит от правильного выбора критериев оптимальности, систем технологических ограничений и стратегий поиска.

В работе [1] на основе использования элементов математического аппарата теории графов, теории множеств и комбинаторной оптимизации реализована пошаговая процедура построения дерева калибровки для прокатки простых сортовых профилей (круг, квадрат, шестигранник) по схеме: равноосное сечение - неравноосное - равноосное. Однако в этой работе не рассмотрен процесс прокатки в ящичных калибрах, характерный для обжимных групп клетей, и возможность увеличения числа общих калибров путем изменения зазора между валками.

Методика, описанная в нашей статье [2], предусматривает построение общих ящичных калибров с учетом регулирования размеров поперечного сечения раскатов путем изменения зазора между валками при переходе с профиля на профиль. Проектирование дерева калибровки осуществляется с помощью пошаговых процедур

при движении по каждой ветви дерева в отдельности, начиная с  $NM(j)-1$  до нулевого уровня. На каждом уровне производится сравнение и объединение калибров близкой ширины. Однако такой порядок анализа не обеспечивает максимальной универсальности калибровки, так как методикой не предусматривается одновременное рассмотрение и сравнение всех калибров, находящихся на одном уровне.

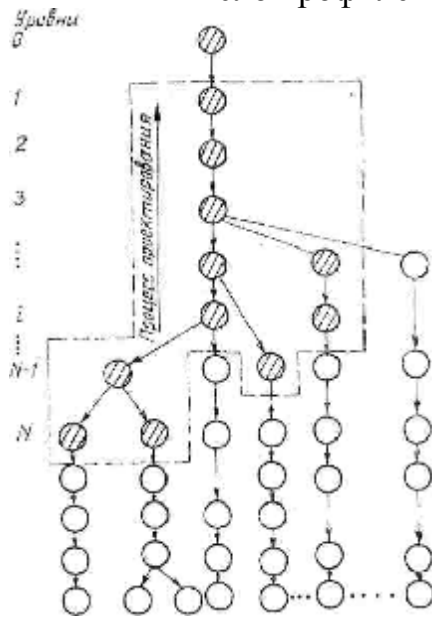
В настоящей статье изложена усовершенствованная методика автоматизированного проектирования калибровок валков с использованием систем вытяжных ящичных калибров, в основу которой положено уровневое проектирование, обеспечивающее минимизацию числа типоразмеров калибров в каждой рабочей клетки стана и оптимизацию числа и размеров исходных заготовок. Алгоритм решения задачи базируется на методе последовательного анализа и отсева вариантов, разработанном В. С. Михалевичем [3].

Калибровка валков сортового стана рассматривается как  $N$  – уровневая иерархическая система (разбиение технологического процесса по вертикали)

$$N = \max_{j=1, M} [NM(j) - 1],$$

где  $NM(j)$  – номер первого фасонного калибра, следующего за обжимными ящичными калибрами, при прокатке  $j$ -го профиля;

$M$  – число профилей в сортаменте стана.



Калибровка валков сортового стана, представленная в виде графа

С точки зрения теории графов общая схема калибровки валков может быть представлена деревом с корнем (см. рисунок) [4]. Число корней определяется числом типоразмеров исходных заготовок, используемых при прокатке профилей всего сортамента. Каждой ветви дерева поставим в соответствие  $j$ -ю подсистему – калибровку валков для прокатки  $j$ -го профиля (разбиение технологического процесса по горизонтали).

Проектирование калибровки валков по уровням протекает в течение  $i$  этапов ( $i = N, N-1, N-2, \dots, 0$ ).

На каждом  $i$ -м этапе проектирования

$j$ -я подсистема характеризуется двумя векторами состояний  $j$ -го раската:  $Y_{ij}$  при его задаче в  $i$ -ю клетку,  $Z_{ij}$  – в  $i$ -й клетки:

$$Y_{ij} = (H_{ij}^k, B_{ij}^k, T_{ij}^k, v_{ij}^k) \quad \text{и} \quad Z_{ij} = (H'_{ij}, B'_{ij}, T'_{ij}, v'_{ij}).$$

Здесь  $H, B, T, v$  (с соответствующими индексами) – высота, ширина, температура и скорость прокатки  $j$ -го раската при задаче в  $i$ -ю клетку и в этой клетке.

Состояния  $Y_{ij}$  и  $Z_{ij}$  могут быть достигнуты в результате выбора вектора управления  $X_{ij}$   $j$ -й подсистемой на  $i$ -м этапе:

$$X_{ij} = (u_{ij}, \Delta h_{ij}, \Delta v_{kj}),$$

где  $u_{ij}$  – компонента вектора управления, определяющая оптимальную ориентацию  $j$ -го раската в  $i$ -й клетке;

$\Delta h_{ij}$  – обжатие в  $i$ -й клетки при прокатке  $j$ -го профиля;

$\Delta v_{ij}$  – изменение конечной скорости при прокатке  $j$ -го профиля.

Зная конечное состояние  $Y_{i+1j}$  и вектор управления  $X_{ij}$ , можно получить состояния  $Z_{ij}$  и  $Y_{ij}$ .

В общем виде уравнения состояния записываются следующим образом:

$$Z_{ij} = P_1(Y_{i+1j}, u_{ij}), \quad j = \overline{1, M}, \quad i = \overline{1, NM(j)-1};$$

$$Y_{ij} = P_2(Y_{i+1j}, X_{ij}), \quad j = \overline{1, M}, \quad i = \overline{1, NM(j)-1}.$$

Рассмотрим пример определения состояний  $Z_{ij}$  и  $Y_{ij}$  для случая, когда  $i$ -я клетка является горизонтальной и после неё раскат не кантуется. Для этого случая уравнения состояния принимают вид:

$$H_{ij}^k = H_{i+1j}; \quad H_{ij} = H_{i+1j} + \Delta h_{ij};$$

$$B_{ij}^k = B_{i+1j}; \quad B_{ij} = B_{i+1j} - \Delta b_{ij};$$

$$T_{ij}^k = T_{i+1j}; \quad T_{ij} = T_{i+1j} + \Delta T_{ij};$$

$$v_{ij}^k = v_{i+1j}; \quad v_{ij} = (F_{i+1j} v_{i+1j}) / F_{ij}.$$

Здесь  $\Delta b_{ij}$  – уширение в  $i$ -м проходе при прокатке  $j$ -го профиля;

$\Delta T_{ij}$  – изменение температуры в  $i$ -м проходе при прокатке  $j$ -го профиля;

$F_{ij}$  и  $F_{i+1j}$  – площадь поперечного сечения  $j$ -го профиля в  $i$ -м и  $(i+1)$ -м проходах соответственно.

Величины  $\Delta b_{ij}$  и  $\Delta T_{ij}$  являются функциями от обжатия:

$$\Delta b_{ij} = f_1(\Delta h_{ij}) \quad \text{и} \quad \Delta T_{ij} = f_2(\Delta h_{ij})$$

Перейдем к формализации задачи проектирования универсальной калибровки валков. Учитывая, что прокатка состоит из ряда взаимосвязанных ступеней и является дискретным управляемым процессом, задачу рассмотрим с точки зрения теории оптимального управления динамическими дискретными системами [5, 6].

В общем виде этапы построения математической модели задачи оптимального управления при проектировании калибровки валков изложены в работе [7] и состоят в формализации критерия оптимальности и в выборе системы ограничений по вектору состояния и управляющим параметрам. При этом подразумевается, что между параметрами технологического процесса установлены однозначные взаимосвязи.

В качестве критерия оптимальности, характеризующего эффективность процесса прокатки в целом, выбрана максимальная среднечасовая производительность стана при производстве профилей всего сортамента:

$$p_{cp} = \frac{1}{\sum_{j=1}^M \frac{\phi_j}{p_j}} \rightarrow \max,$$

где  $p_{cp}$  – среднечасовая производительность стана при прокатке профилей всего сортамента, т/ч;

$\phi_j$  – доля  $j$ -го профиля в сортаменте стана;

$p_j$  – среднечасовая производительность стана при прокатке  $j$ -го профиля, т/ч.

В условиях непрерывной прокатки

$$P_j = \frac{K_{uj} F_{ucxj} L_{ucxj} \gamma_j}{\frac{3600 L_{ucxj} F_{ucxj}}{v_{kj} F_{kj}} + \tau_{nj}} ,$$

где  $K_{uj}$ ,  $F_{ucxj}$ ,  $L_{ucxj}$ ,  $\gamma_j$ ,  $v_{kj}$ ,  $F_{kj}$ ,  $\tau_{nj}$  – соответственно коэффициент использования стана, площадь поперечного сечения, длина и плотность металла исходной заготовки, конечная скорость прокатки, площадь поперечного сечения готового профиля, пауза между выдачей заготовки из печи и поступлением в клеть.

Сложность задачи достижения максимальной среднечасовой производительности обусловливается неопределенностью в выборе конкретных параметров ( $K_{uj}$ ,  $L_{ucxj}$ ,  $\tau_{nj}$ ), а также тем обстоятельством, что проектировщику неизвестен порядок прокатки профилей на стане. Именно разработка универсальных калибровок позволит решить эту задачу.

При использовании систем вытяжных ящичных калибров в обжимных группах клеток целевая функция  $\Phi$ , обеспечивающая максимальную универсальность калибровки валков, представляется в виде:

$$\Phi = \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i} \sum_{l \in S_i} (B_{ij}^k - B_{il}^k)^2 + \sum_{j \in l} \sum_{l \in S_0} [(H_{oj} - H_{ol})^2 + (B_{oj} - B_{ol})^2] \rightarrow \min \quad (1)$$

где  $N_i$  – множество индексов  $j$ -х раскатов, у которых ящичные калибры находятся на  $i$ -м уровне;

$S_i$  – множество индексов  $l$ -х раскатов, у которых ящичные калибры находятся на  $i$ -м уровне и при этом  $l > j$ , то есть рассматриваются всевозможные не дублирующие друг друга квадраты разностей ширин калибров.

Первое слагаемое в целевой функции  $\Phi$  обеспечивает минимум ширин калибров на каждом уровне технологического процесса, второе – минимум типоразмеров исходных заготовок, используемых при прокатке всего сортамента.

Область допустимых управлений определяется системой технологических ограничений (2)÷(8):

– по углу захвата

$$\alpha_i \leq [\alpha_i]_{don}, \quad i = \overline{1, N}, \quad j \in N_i; \quad (2)$$

– по соотношению размеров поперечного сечения раската перед клетью

$$\max \left\{ \frac{B_{i-1j}}{H_{i-1j}}, \frac{H_{i-1j}}{B_{i-1j}} \right\} \leq a, \quad i = \overline{1, N}, \quad j \in N_i; \quad (3)$$

– по усилию прокатки

$$P_{ij} \leq [P_i]_{don}, \quad i = \overline{1, N}, \quad j \in N_i; \quad (4)$$

– по моменту прокатки

$$M_{ij} \leq [M_i]_{don}, \quad i = \overline{1, N}, \quad j \in N_i; \quad (5)$$

– по частоте вращения валков

$$n_{ij} \leq [n_i]_{don}, \quad i = \overline{1, N}, \quad j \in N_i; \quad (6)$$

– по мощности прокатки

$$N_{ij} \leq [N_i]_{don}, \quad i = \overline{1, N}, \quad j \in N_i; \quad (7)$$

– по минимальной величине вытяжки

$$\lambda_{\min} \leq \lambda_{ij}, \quad i = \overline{1, N}, \quad j \in N_i; \quad (8)$$

Для сравнения и объединения калибров близкой ширины на каждом уровне введены вектор эффективности использования калибра

$$K_{ij}^{\kappa.\delta} = (K_{ij}^R, K_{ij}^\lambda, K_{ij}^P, K_{ij}^M, K_{ij}^N, K_{ij}^v)$$

и система ограничений (9)÷(17):

– по ширине калибра при изменении направления обжатия в двух смежных проходах и без изменения соответственно

$$B_{i-1j}^{\kappa.\delta} \geq K_{ij}^R B_{i-1j}^{K'}, \quad i = \overline{2, N}, \quad j \in N_i; \quad (9)$$

$$B_{i-1j}^{\kappa.\delta} \leq K_{ij}^R B_{i-1j}^{K'}, \quad i = \overline{2, N}, \quad j \in N_i; \quad (10)$$

– по поперечному сечению исходных заготовок:

если заготовка поступает в горизонтальную клеть

$$H_{oj}^{\delta} \geq K_{1j}^R H'_{oj}, \quad j = \overline{1, M}; \quad (11)$$

если заготовка поступает в вертикальную клеть

$$B_{oj}^{\delta} \geq K_{1j}^R B'_{oj}, \quad j = \overline{1, M}; \quad (12)$$

– по вытяжной способности калибра

$$\lambda_{ij}^{\delta} \geq K_{ij}^\lambda \lambda'_{ij}, \quad j = \overline{1, N}, \quad j \in N_i; \quad (13)$$

– по усилию прокатки

$$P_{ij}^{\delta} \geq K_{ij}^P P'_{ij}, \quad j = \overline{1, N}, \quad j \in N_i; \quad (14)$$

– по моменту прокатки

$$M_{ij}^{\delta} \geq K_{ij}^M M'_{ij}, \quad j = \overline{1, N}, \quad j \in N_i; \quad (15)$$

– по мощности прокатки

$$N_{ij}^{\delta} \geq K_{ij}^M N'_{ij}, \quad j = \overline{1, N}, \quad j \in N_i; \quad (16)$$

– по конечной скорости прокатки

$$v_{ij}^{\delta} \geq K_{ij}^v v'_{ij}, \quad j = \overline{1, N}, \quad j \in N_i, \quad (17)$$

где  $B_{i-1j}^{K'}$  – ширина калибра в  $(i-1)$ -й клетки, если бы при прокатке  $j$ -го подката в этой клетки находился «свой» типоразмер калибра;

$B_{i-1j}^{\kappa.\delta}$  – ближайшая ширина калибра на  $(i-1)$ -м уровне, с которой проверяется возможность объединения текущей ширины калибра при прокатке  $j$ -го подката;

$H'_{oj}, B'_{oj}$  – соответственно высота и ширина исходной заготовки, если бы при прокатке  $j$ -го профиля использовался «свой» типоразмер исходной заготовки;

$\lambda_{ij}^{\delta}, P_{ij}^{\delta}, M_{ij}^{\delta}, N_{ij}^{\delta}, v_{ij}^{\delta}$  – соответственно коэффициент вытяжки, усилие, момент, мощность, скорость прокатки в  $i$ -й клетки при условии объединения текущего размера с ближайшим;

$\lambda'_{ij}, P'_{ij}, M'_{ij}, N'_{ij}, v'_{ij}$  – соответственно коэффициент вытяжки, усилие, момент, мощность, скорость прокатки в  $i$ -й клетки, если бы при прокатке  $j$ -го профиля в  $(i-1)$ -й клетки находился «свой» типоразмер калибра.

Компоненты вектора эффективности  $K_{ij}$  задаются экспертом, знающим особенности стана и условия прокатки профилей. Выбор оптимального варианта технологии осуществляется варьированием компонентов вектора эффективности, которые изменяются в пределах  $[0, 1]$ . Для предварительного расчета можно принять их равными  $\varphi_j$ ,  $j = \overline{1, M}$ ,  $i = \overline{1, N}$ , где  $\varphi_j$  – доля  $j$ -го профиля в сортаменте. Чем меньше значение компонентов вектора эффективности, тем выше универсальность

калибровки стана в целом, то есть общие калибры обжимной группы находятся на более низких уровнях.

Для осуществления общего дискретного процесса проектирования по каждой  $j$ -й подсистеме задается начальное состояние

$$Y_{ij} = Y_{ij}^o, \quad j = \overline{1, M}, \quad i = NM(j). \quad (18)$$

Особенности и специфика поставленной задачи:

1) процесс разработки калибровки валков осуществляется по уровням технологического процесса против хода прокатки;

2) на каждом  $i$ -м уровне по всем подкатам  $(i-1)$ -го уровня решается задача объединения калибров;

3) целевая функция является аддитивной относительно уровней технологического процесса;

4) для каждой подсистемы  $j = \overline{1, M}$  задано начальное состояние  $Y_{ij}^o$ , параметры и ориентация прямоугольного подката, поступающего в первый фасонный калибр.

Таким образом, состояния  $Y_{ij}$  и  $Z_{ij}$   $j$ -й подсистемы на  $i$ -м уровне и оценка  $i$ -го этапа в целевой функции зависят только от вектора управления  $X_{ij}$  на  $i$ -м этапе и состояния  $Y_{i+1,j}$  на  $(i+1)$ -м этапе, то есть рассматриваемая задача (1) ÷ (18) представляет собой марковскую динамическую задачу дискретной оптимизации [6]. Для ее решения может быть применен метод динамического программирования [8]. Однако наиболее общим методом решения этой задачи, максимально использующим ее специфику, является метод последовательного анализа и отсева вариантов [3]. В его основе лежит идея представления процесса решения задачи в виде многоступенчатой структуры, напоминающей структуру сложного опыта. На каждой ступени проверяется наличие тех или иных свойств у подмножества вариантов, что ведет либо к сокращению исходного множества вариантов, либо подготавливает возможность такого сокращения в будущем.

Основные этапы алгоритма уровневого проектирования универсальных калибровок валков с использованием метода последовательного анализа и отсева вариантов:

1. Выделение самого нижнего уровня по всем рассматриваемым прямоугольным раскатам, которые задаются в фасонные калибры

$i = \max_{j=1, M} [NM(j) - 1]$  и организация цикла по числу уровней от  $N$  до 0.

2. Выделение раскатов, находящихся на  $i$ -м уровне.

3. Проверка наличия на верхних уровнях раскатов, близких по размерам раскатам  $i$ -го уровня. Если такие имеются, то проходы между раскатом  $i$ -го уровня пропускаются.

4. Определение оптимальной ориентации раскатов на  $i$ -м уровне.

5. Выделение раскатов, находящихся на  $(i-1)$ -м уровне, и определение их оптимальной ориентации.

6. Осуществление шага по раскатам с  $i$ -го на  $(i-1)$ -й уровень с целью их упорядочения на  $i$ -м уровне. Величина обжатия  $\Delta h_{ij}$  определяется исходя из максимального допустимого угла захвата. Проверяется выполнение ограничений (3) ÷ (8). Если не выполняются ограничения (3) ÷ (5), то величина обжатия  $\Delta h_{ij}$  уменьшается на некоторую величину и повторяется проверка. При невыполнении ограничений (6) и (7) уменьшается конечная скорость прокатки рассматриваемого раската и процесс

проектирования начинается с самого нижнего уровня. При невыполнении ограничения (8) проход пропускается.

7. Упорядочение раскатов, находящихся на  $i$ -м уровне. Раскаты делятся на две группы:

первая – направление обжатия которых на  $(i-1)$ -м уровне изменяется; на  $i$ -м уровне эти раскаты располагают таким образом, чтобы на  $(i-1)$ -й уровень они передавались в порядке возрастания ширин калибров;

вторая – направление обжатия которых на  $(i-1)$ -м уровне не изменяется; на  $i$ -м уровне эти раскаты располагают таким образом, чтобы на  $(i-1)$ -й уровень они передавались в порядке убывания ширин калибров.

8. Установление порядка перехода раскатов по группам (сначала первой, а затем второй) с  $i$ -го на  $(i-1)$ -й уровень с целью их объединения. Объединение калибров и исходных заготовок осуществляется при выполнении ограничений (9) ÷ (17).

Разработанный алгоритм реализован в виде отдельного программного модуля. Результаты проектирования выводятся на экран дисплея и выдаются на печать в виде таблиц. В таблицах приводятся размеры сечений по проходам, катающие диаметры валков, углы захвата, температурно-скоростные, энергосиловые и другие параметры прокатки. После проектирования калибровки валков для каждого профиля уточняется расчет температурно-скоростных и энергосиловых параметров по разработанной в институте универсальной программе [9].

Разработанная методика использована при оптимизации технологии прокатки сортовых и фасонных профилей в обжимных клетях стана 600 Алчевского металлургического комбината и стана 300–2 Узбекского металлургического завода.

## Выводы

Разработана методика компьютерного проектирования универсальных калибровок валков в черновых клетях сортовых станов с использованием систем вытяжных ящичных калибров, в основу которой положено уровневое проектирование, обеспечивающее минимизацию числа типоразмеров калибров в каждой рабочей клетке стана и оптимизацию числа и размеров исходных заготовок. Проектирование осуществляется с помощью пошаговых процедур при движении по каждой ветви «дерева» калибровки.

**Список литературы:** 1. Гусев А.А. Разработка методов технологических расчетов при проектировании с применением ЭВМ сортопрокатных станов: Автореф. дис ... канд. наук. – Свердловск. УПИ, – 1987. – 24 с. 2. Медведев В.С., Стрюков С.Б. Оптимальное проектирование универсальных калибровок валков в обжимных клетях сортовых станов // Производство сортового проката: Отрасл. сб. науч. тр. – Харьков: УкрНИИмет, – 1987. – С. 30–36. 3. Михалевич В.С., Волкович В.Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем – М.: Наука, – 1982. – 287 с. 4. Берж К. Теория графов и ее применение. – М.: ИЛ, 1962. – 320с. 5. Болтянский В.Г. Оптимальное управление дискретными системами. – М.: Наука, 1973. – 446 с. 6. Рихтер К. Динамические задачи дискретной оптимизации / Пер. с нем. – М.: Радио и связь, 1985. – 136 с. 7. Илюкович Б.М., Меркурьев С.Е. К вопросу постановки задачи оптимального управления при проектировании калибровок прокатных валков // Изв. вузов ЧМ. 1974. № 2. – С. 91–94. 8. Беллмай Р. Динамическое программирование / Пер.с англ. – М.: ИЛ, 1960. – 400 с. 9. Медведев В.С. Новые эффективные способы расчета на ЭВМ калибровок и технологических параметров прокатки фасонных профилей // Сортопрокатное производство: Отрасл. сб. науч. тр. – Харьков: УкрНИИмет, 1978. – С. 44–46.

*Поступила в редколлегию 11.11.2008*